

*機械工学科助教授
1993年6月15日受付

Pe	: 排気圧力	MPa, (kgf/cm ²)	γ_w	: 冷却水比重量	(gf/cm ³)
Pmax	: 最高燃焼圧力	MPa, (kgf/cm ²)	δ	: 平均油粒径	μm
Pme	: 正味平均有効圧	MPa, (kgf/cm ²)	ΔP	: 噴射有効圧力	MPa, (kgf/cm ²)
Pmi	: 図示平均有効圧	MPa, (kgf/cm ²)	ε	: 圧縮比	
P _N	: 噴射圧力	MPa, (kgf/cm ²)	η_m	: 機械効率	
Pp	: 燃料ポンプ出口圧力		θ	: クランク角	deg
		MPa, (kgf/cm ²)	θ_{gc}	: 静的圧送開始時期	deg
P _s	: 給気圧力	MPa, (kgf/cm ²)	θ_i	: 着火時期 (A. T. D. C.)	deg
Qa	: 空気消費量	kg/h, (kgf/h)	λ	: 平均空気過剰率	
qa	: 空気消費率		μ	: 流量係数	
		kg/(kW·h), (kgf/PS·h)	ν	: 粘度	Pa·s, (kgf·s/m ²)
Q _w	: 冷却水流量	l/min	ρ_a	: 空気密度	kg/m ³
R	: 空気のガス定数				
		kJ/(kg·K), (kgf·m/kgf·K)			
S	: 表面張力	N/m, (kgf/m)			
t	: 燃料噴射後の経過時間	ms			
T ₁	: コンプレッサー入口空気温度	K, (°C)			
T ₂	: コンプレッサー出口空気温度	K, (°C)			
T ₃	: インタークーラー出口給気温度				
		K, (°C)			
T ₄	: タービン入口ガス温度	K, (°C)			
T ₅	: タービン出口ガス温度	K, (°C)			
Tb	: クランク角115deg.B.T.D.C.での				
	筒内ガス温度	K, (°C)			
T _{C1}	: 機関入口冷却水温度	K, (°C)			
T _{C2}	: 機関出口冷却水温度	K, (°C)			
T _{Ch}	: シリンダヘッド出口冷却水温度				
		K, (°C)			
Te	: 排気温度	K, (°C)			
Tf	: 燃料油温度	K, (°C)			
Tgas	: 筒内ガス温度	K, (°C)			
T _{J1}	: ジャケット入口冷却水温度	K, (°C)			
T _{J2}	: ジャケット出口冷却水温度	K, (°C)			
T ℓ	: ライナ温度	K, (°C)			
T _s	: 給気温度	K, (°C)			
W _N	: 噴出速度	m/s			
Z	: 気筒数				
α	: 噴霧角の1/2	deg			
γ_a	: 空気比重量	(kgf/m ³)			
γ_b	: 燃料比重量	(kgf/m ³)			

第1章 緒 論

1. 1 ディーゼル機関と燃料油の歴史的背景

産業の発展にともなつて石油使用量の増大が続いている。特に、軽質燃料油の需要が増大しているので、残査油を主とする船舶用の燃料はより低質な燃料油の使用を検討する必要にせまられている。

1950年代初期からディーゼル油の価格が上昇し始め、当時ボイラにのみ使用していたバンカー油を、船用ディーゼル機関で燃焼させる研究が始められ、これを実船に使用することにより、船舶の運航費を節減する研究も行われた。これにならない全世界の船用機関界においても、バンカー油をディーゼル機関に実用する様になってきた。さらに、1973年の石油危機後には燃料油の価格が著しく上昇し、主機関自身並びに船全体としての燃料消費量の低減が厳しく進められてきた。その結果、4 サイクル機関の燃料消費率は210g/(kW·h) [155gf/PS·h] 台から180g/(kW·h) [130gf/PS·h] 台へ、2 サイクル機関においては160g/(kW·h) [120gf/PS·h] 台へと著しい低減が計られてきている。

さらに、船用機関国際シンポジウム東京'73 (ISME TOKYO'73) において「燃料油の低質化と船用機関の動向」⁽¹⁾ というテーマでパネル・ディスカッションが行われ、燃料油低質化の見通し、

主機械改善への要望、各機種開発の動向等に関する論文発表と活発な討論が行われた。このシンポジウムが一つの刺激剤となり、世界の船用機関関係者が低質燃料油燃焼の研究に一層の努力を集中することになった。

1978年に The Motor Ship 誌は3月号⁽²⁾において、燃料油の将来について British Petroleum 株式会社の予想を挙げて、低質燃料油に対する論評を行い、その中で、軽質分の需要の伸び率が急激に上昇するため、さらに低質の、接触分解法で分解、精製された F. C. C. 油や熱分解法で分解、精製された Visbreaking 残渣油を使わなければならないと述べ、この問題を解決しないと石炭と石油の混合物の燃焼が可能な蒸気・タービンに取って代わられると警告した。さらに、5月号以降^{(3)~(9)}に低質燃料油の動向と各機関の対策について、世界のディーゼルメーカの代表者に求めた意見を誌上で発表した。これらの事情を踏まえて、低質燃料油を燃焼させる研究が進められてきたが、後述する様に、これらの低質燃料油は、粘度も高く、比重も大きく、さらに残留炭素やアスファルテン分が多いので、燃焼性が悪い。このため、これらの低質燃料油を燃焼する機関において燃焼障害が発生し、ライナーに亀裂などが見られることが多くなった。この他、接触分解法でえられた F. C. C. 油には、触媒の一部が残留してエンジン部品の異常摩耗の原因となっている。これらの問題解決のため、省エネルギーと併せて低質燃料油燃焼の研究が進められ、今日に至っている。

石油資源の有限性と人口増加率や文明発達などをグローバルに眺めると、さらに低質な燃料油を実用する研究が必要であり、この問題を解決するため、ディーゼル機関としては、今日まで歩んできた道を顧みながら、その特性を原理的に見直し、今後さらに低質化して行く燃料油に対するその燃焼の方策を研究開発して行く必要があると考えられる。

低質燃料油に関する石油精製過程を図1-1に示す。まず、原油を大気圧の下で蒸留し、ガス、ガソリン、灯油、軽油などの軽質分を留出し、そ

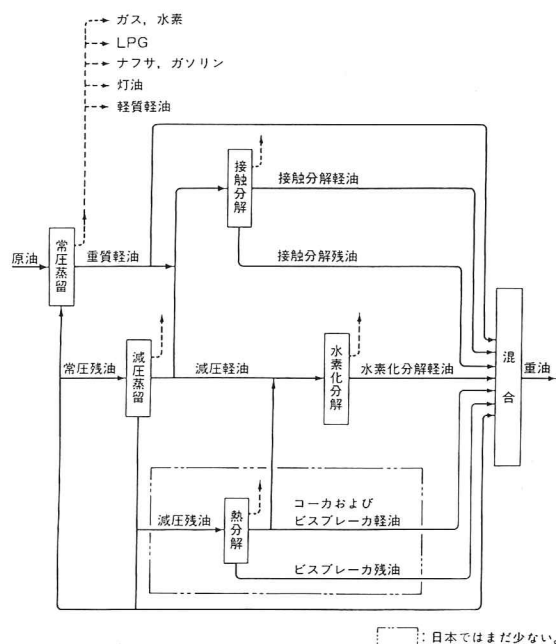


図1-1 石油精製過程

の残留分を真空下で再び蒸留する。さらに、石油の需要構造にマッチさせるために軽質分の収量を増す目的で蒸留後の残渣油から接触分解法 (F. C. C.) や熱分解法 (Visbreaking) を用いて分解、精製する技術が開発され実用化されるに至った。

蒸留法で精製された軽質分は、直鎖系の炭化水素が主成分であるので、燃料油として用いる場合に、着火性その他の燃焼特性は良好である。

しかし、接触分解法や熱分解法によって分解精製された軽質分は、殆んどがナフテン系、或はアロマトック系の環状構造を持つ炭化水素である。低質燃料油は各プロセスにより出てくる釜残油をこの軽質油とブレンドして造られるので、直留系燃料油に比べ比重、炭素水素比が高く、極端にその燃焼性が悪くなっている。

一方、ディーゼル機関の動向は、近年、特に次の四点において進歩、発展して来たが、今後も、この動向にそった開発研究が続けられて行くと考えられる。

(1) 出力率の向上

- (2) 耐久性の向上
- (3) 省エネルギー
- (4) 人間および自然環境に対する無公害性の向上

前述の様に、その使用燃料油については、大形低速から小形高速にいたる各機種とも、それぞれの機関が現在使用している燃料油よりも数段低質な燃料油を燃焼しなければならなくなるが、その粗悪燃料油をたきながら上記の4項目に添った改善や開発を続けて行かねばならないので、その困難性は益々厳しくなり、その研究も更に進んだものが要求されてくるであろう。

1. 2 従来の研究

このような背景のもとに限りある石油資源の有効利用の研究が世界的に展開され、主として燃料消費率の低減という量的改善が行われてきた。しかしながら、今後、現在使用している燃料油より数段低質な燃料油の燃焼を実用化するという質的改善へ移行する必要があると思われる。

前述のように、石油資源の問題から、石油精製法にからんだ石油重質化傾向があり、船用重油も高粘度化、低質重質化は避けられない^{(10)~(13)}。これに対して、実験機、および実用機関での試験から低質燃料油燃焼の特性とその問題点が明かにされつつある⁽¹⁴⁾。さらに、わが国で生産されているディーゼル機関も対策を考慮中であり、これらの開発状況、具体的な対策の実例、および実機での運転成績等の報告もある^{(15)~(35)}。しかしながら、これらの報告には、燃料油の本質が明確に把握されているものが少なく、運転条件が明確でないもの、燃焼の評価が充分でないものが多い。最近の「船用燃料油の変遷」⁽³⁶⁾の報告の中では使用燃料油の低質化、新燃料の検討について述べられている。また、大形、中形中速ディーゼル機関での低質燃料油の燃焼については、耐久性を含めて、多くの研究が報告されている^{(37)~(39)}。低質燃料油が機関性能および機関部品に与える影響についての報告もなされており⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾、また、さらに高速ディーゼル機関でA/Cブレンド油の燃焼の報告⁽⁴²⁾もある。

しかし、本格的な低質燃料油燃焼の研究は少なく、とくに本研究がねらいとしている高粘度、高比重、高炭素水素比の燃料油での報告は見あたらないのである。従って、本研究は低質重油を燃焼するための小形高速ディーゼル機関の設計条件を見いだすと言う点で目新しい研究と考えられる。

1. 3 本研究の目的と本論文の要旨

有限な石油資源活用のためには、ディーゼル機関燃料に対して、いろいろの角度から検討しておく必要がある。本研究はとくに低質燃料を用いる場合の対策について検討を行い、燃料消費率を始めとする機関一般性能、および燃焼室壁などの各部品の耐久性や振動、騒音を始めとする環境性等において、A重油と同等の燃焼が出来る機関の設計条件を見出すことを目的とするものである。

この目的のために、まず、大、中形ディーゼル機関のみが常用する粘度1500秒 (R. W. No. 1 at 100 F) の燃料油を始め種々の燃料油の燃焼特性の基礎的検討を行った。

この燃焼特性をふまえて、これらの燃料を用いたときの機関性能を検討した。

供試機関としては、燃焼室が小形で高速なため許容燃焼時間が短く、燃焼にかかわる空気供給量不十分等、低質燃料油の燃焼の困難な、内径110 mm、回転数43S⁻¹ (2600rpm) の小形漁船用機関を選んで研究を行った。

本論文は以上のような目的で実施した研究を纏めたものであり、次のような内容になっている。

第1章は緒論で、ディーゼル機関と燃料油の歴史的背景と従来の研究、ならびに、本研究の目的と本論文の要旨について述べている。

第2章は、低質燃料油燃焼の基礎的研究として、燃焼過程の基本となる単一油滴の蒸発および燃焼過程を中心に実施した試験について述べている。この試験により低質燃料油の蒸発性の低さ、着火遅れの長さ、燃焼後の残査の多さが問題である事

が明かとなり、更に、低質燃料油を燃焼するに当たっての蒸発および燃焼特性を把握することができた。

第3章は、まず、低質燃料油の微妙な燃焼の特性を実機において検証するため、実験対象機関として、小形高速機関を選定した理由を述べている。

小形高速機関は大形低速機関に比べ、行程容積当りの燃焼室内の表面積が大きく、許容しうる燃焼時間が短く、低質燃料油の燃焼にとっては致命的に不利である。このような機関の弱点をカバーすることが低質燃料油燃焼対策である。まず、基本的な研究を無過給機関で行い、更に、実用化対策の研究を過給機関で行った。

実験に際しては、燃焼の挙動を正しく評価するため、次のような考慮をはらった。

給気系、燃料系、冷却系の圧力、温度、流量等の運転条件を正確に制御した(所定値の $\pm 0.5\%$ の精度)。

燃焼の解析については、筒内圧、噴射圧、噴射弁リフト等を特殊な燃焼解析装置を用いてオンラインで計測し、クランク角 1° 毎の値を、360サイクルの平均値として求めた。さらに、熱負荷を評価するために、ライナー温度を無過給機関において24点、過給機関において19点で計測した。

燃焼室壁の温度計測については、直径0.5mmのシース熱電対を用い、かつ、熱電対挿入孔と熱電対間の空間をプラズマ溶射で完全に充填し、熱電対の装着によって、熱の流れを乱さないような工夫を行なった。

振動は機関本体表面各部に、ピエゾ加速度変換器を装着し、信号をチャージアンプで増幅後FFT装置(高速フーリエ変換器)を用いて周波数分析を行った。

機関騒音は2つのマイク間距離が12mmの2連マイクロフォンを用いる音響インテンシティ法を適用し、無響室を使用せずに周波数毎の騒音をエネルギーとして定量的に把えた。

また、低質重油の燃焼の総合評価をするために“SES”(Synergistic Evaluation System)と名

づけた評価法で、燃焼過程の実体を定量的に把握して評価し、その中で燃焼解析を詳細に行うため使用した熱発生率、LogP-LogV等のサイクル解析、熱収支、噴霧の油粒径、噴霧の到達距離等の数値計算法について述べている。

第4章においては、燃料油についての燃料油精製過程の推移と低質燃料油の関係を述べ、また、燃焼を支配する低質燃料油の本質と考えられる粘度、比重、セタン指数、炭素水素比、蒸留特性、分子量分布等を始めとする物理的、化学的性質を詳細に述べている。

第5章は、低質燃料油を良好に燃焼させるための設計条件を見いだすための研究経過およびその内容について述べている。まず、低質燃料油の微妙な燃焼の特性を把握するため、基本的な研究を無過給小形高速機関で行った。燃料噴射系統、冷却系統などの燃焼を支配する個々の因子を独立に変化させた。また、無過給機関での燃焼を支配する空気量の基本的影響を同時に把握するため、電動のプロワで加圧できる給気系統を用い、それぞれが機関性能に及ぼす影響を正確に把握するなど、無過給機関の初期燃焼および主燃焼特性について研究した結果を述べている。

着火を含む初期燃焼特性については、粘度の違う3種の重油およびセタン指数の違う4種の軽油について研究した。低質燃料油は燃料油の蒸発特性等から判断して、着火性が悪いと思われる。また、着火を含む初期燃焼特性は燃料油の蒸発特性、噴射モード、筒内空気温度と流れなどにより支配されると考えられる。従って、給気温度を変化させ、着火を含む初期燃焼特性に及ぼす影響も把握した。

主燃焼特性については、燃料噴射系統、冷却系統などの燃焼を支配する個々の因子を独立に変化させ、それぞれが機関性能に及ぼす影響を正確に把握した。

低質重油では高分子量で、アロマトミック分などが多ければ、その主燃焼は困難となる。しかし

ながら、燃料油温度の上昇による燃料粘度の適正化、高圧噴射による油粒の微細化ならびに、適当な到達距離等の噴霧条件と、空気流量の増大を含むスワールとのマッチングにより良好な燃焼が得られることを定量的に確認した。また、冷却水温度を高めることにより、燃焼室壁温が上り、その結果、冷却損失の低減による燃費減少が得られた。

第6章は、低質燃料油燃焼の基礎研究の結果を踏まえて、排気過給小形高速機関を使用して実施した低質燃料油の燃焼試験について述べている。

低質重油を良好に燃焼させる設計条件として、(1) 十分な空気量、(2) 高圧噴射による燃料霧化の促進、(3) 燃焼室形状および空気スワールに適合した燃料油の分散、(4) 燃焼室の適切な温度条件など、基本原理に沿った燃焼改善対策試験の研究結果が明らかにされたことを述べている。

第7章は、前章での成果を踏まえて、更に、低質な高粘度、高比重、高炭素水素比のしかも蒸発特性、着火性、燃焼性などが著しく劣る燃料油燃焼の実用対策を実施した研究について述べている。

燃料系統においては、噴射時期の適正化、燃料噴射ポンププランジャ径の増加、カムリフトの増加、燃料弁噴孔面積の減少等により高圧噴射を実現させ、良好な燃焼条件を求めた。高圧噴射による二次噴射を防ぐため燃料弁噴孔数、燃料噴射管、吸戻弁の吸戻量等の適正化を行った。

第8章は、低質燃料油燃焼試験によって得られた試験結果を踏まえ、サイクル論的考察をはじめ、着火促進剤添加による燃焼特性の変化、着火遅れの短縮状況、振動、騒音などの燃焼に関するその他の研究および基礎的考察について述べている。

第9章は、本研究の結論を述べている。即ち、低質油を良好に燃焼させるには、(1) 十分な空気量、(2) 高圧噴射による燃料霧化の促進、(3) 燃焼室形状およびスワールに適合した燃料噴射、(4) 燃焼室の適切な温度条件など、基本原理に

沿った燃焼改善対策を行えばよいということである。このことは、機関のサイズが変わっても共通して言える事であるので、大形機関と小形機関では、本研究における小形高速機関での燃焼改善対策は、大きい意味で、大形ないし中形機関にも適用できると述べている。

第2章 低質燃料油滴の燃焼に関する研究

2-1 試験のねらい

低質の燃料油を舶用ディーゼル機関に使用するにあたっては、その燃料油の性質に基づく燃料処理法、燃料噴射法、燃焼法を確立するため、その特性を明らかにしていく必要がある。

本研究は、まず、低質燃料油燃焼の基礎研究として、燃焼過程の基本となる単一油滴の蒸発および燃焼過程を中心に、試験を実施した。

低質燃料油油滴は、蒸発過程で油滴内部に気泡が発生し、特にセノスフェアの形成のため粒径変化のみでは、その蒸発特性を定量的に表すことはできない。そこで、蒸発特性を油滴の重量変化から評価し、低質燃料油の蒸発特性を明らかにした。また、低質燃料油油滴の着火、燃焼状況を高速度カメラで撮影し、その特性を把握した。

試験に使用した燃料油の性状を表2-1に示す。

2.2 試験装置

単一油滴の燃焼試験装置を図2-1に示し、その装置全体の写真を図2-2に示す。

外部からの操作により移動可能な可動式高温室(1)が、円筒形圧力容器内に装備されている。油滴を外部の油滴製粒器(2)で造り、圧力容器内のたわみ石英棒(3)の先端に吊るす。雰囲気ガスは、減圧弁(4)を介して連らなっている高圧ボンベ(5)から供給される。高温室内部は熱線(6)が巻かれており、外部のコントローラによりガス温度が制御できるようになっている。高温室以外の領域は冷却水管(7)により冷却されており、高温室からの熱放散により温度が上昇しないようにしてある。油滴(8)は、まず圧力容器中央にある高温電気炉移動用ハンド

表 2-1 供試燃料油の物理的, 化学的性状

Name of Fuel	Gas Oil	C Oil	Visbreaking Oil	FCC Oil
Specific Gravity @ 15/4 °C	0.805	0.925	0.975	1.002
Pour Point °C	—	—	10	10
Flash Point °C	61	98	87	104
Viscosity cSt	2.1	100.3	810	688
(Rw-No. 1: 50°C) s	31	409	3,305	2,807
Ash %	—	—	0.04	0.05
Water %	0.01	0.06	0.02	0.01
C. C. R. %	—	8.37	18.85	15.88
Net Calorific Value J/g	45,660	43,320	42,520	41,980
C/H Ratio	6.18	7.42	8.03	8.65
Cetane Index	—	34.9	18.5	12.2
Component				
Carbon %	85.3	85.3	85.1	86.5
Hydrogen %	13.8	11.5	10.6	10.0
Oxygen %	0.4	0.6	0.7	0.5
Nitrogen %	0.00	0.2	0.50	0.32
Sulfur %	0.49	2.37	3.08	2.63

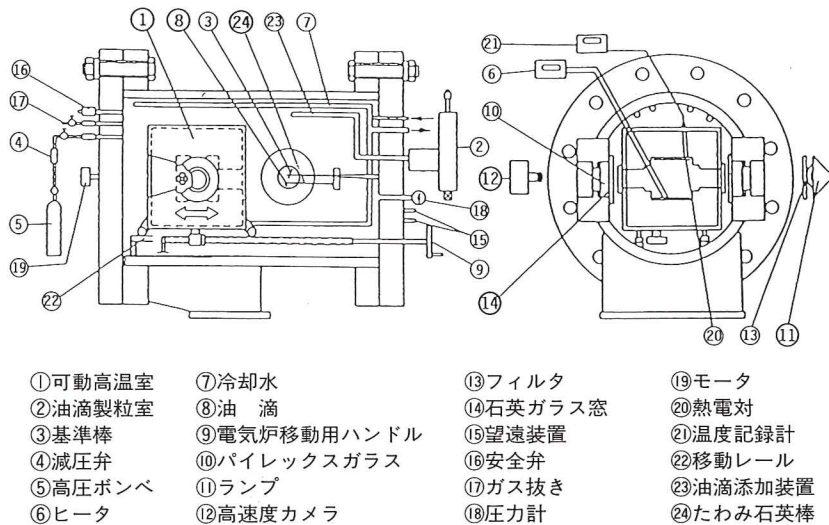


図 2-1 単一油滴燃焼試験装置

ル(9)で高温室を移動し、油滴を高温雰囲気中に置くことができる。

以上のようにして準備された油滴はパイレックスガラス窓(10)を通して外部ランプで光を当て、一方の窓を通して高速度カメラ(12)によって撮影する。撮影速度は蒸発現象の平均的な時間と、フィルムの長さにより、約400コマ/秒とし、光源は通常

照明用として使用されている500Wのリフレクタランプを用いた。フィルムはASA400の16mmフィルムを使用した。表2-2に撮影条件の一覧を示す。

油滴は懸垂棒の先端につるされるが、懸垂棒の選択に当たっては次の事柄を考慮した。

(1) 高温に耐え、強度的に十分なこと。

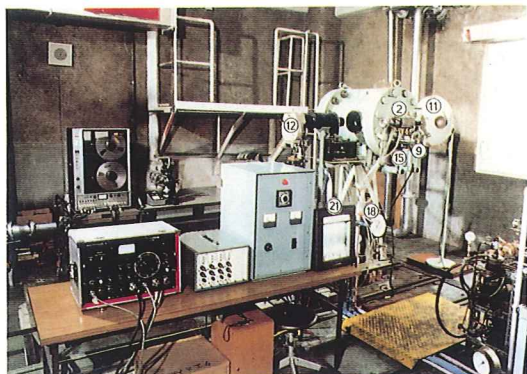


図 2-2 単一油滴燃焼試験装置の写真

(2) 油滴の蒸発，燃焼など物理化学反応に影響を及ぼさないこと。

高温に耐え得るものとして考えられるものは石英棒および白金線，タングステン線，ニッケル線等があるが，油滴の蒸発，燃焼などの物理化学反応に影響を及ぼさないことが大切である。懸垂棒が油滴に与える熱，油滴から懸垂棒へ移る熱，特に油滴の径が小さくなった場合の熱移動を考慮すれば，熱伝導率も小さく温度伝導率も小さいことが望ましい。

白金線の場合には触媒作用により燃焼に影響を及ぼすと考えられるので，懸垂棒としては，石英棒を採用した。表 2-3 に各懸垂棒の熱伝導率と温度伝導率を示した。

2. 3 計測方法

2. 3. 1 油滴重量の計測

石英棒の先端に吊された油滴の蒸発時における重量を求めるため，石英棒のたわみ量と重量の関

表 2-2 撮影条件

高速度カメラ	カメラ名	ハイカム高速度カメラ
	形 式	40-0001形 16mm ハイカム100フィート形
	レ ン ズ	EL-NIKKOR 210mm f/5.6
	撮影速度	能 力 20~8000 こま/秒 試験時 400~800 こま/秒
光 源	500W リフレクタランプ	
フィルム	白黒ネガフィルム	ASA 400
	カラーフィルム	ASA 400

係をあらかじめ求めておく必要がある。石英棒の先端に0.40~2.50mgf までのおもりを付け35mmカメラで撮影し，撮影フィルムからたわみ量と荷重との関係を求めた。

図 2-3 に重量とたわみ量の関係を示した。この計測の範囲内では荷重とたわみ量は比例しており，このときの縦弾性係数を求めると $E=1.07 \times 10^{10}(\text{mgf}/\text{mm}^2)$ となる。また，この試験温度(700°C)内では，Eの温度による変化は数%以内であることから，この値を基に図 2-4 に示すたわみ量 $\Delta\delta$ を計測し，次式で油滴の重量 W を求め

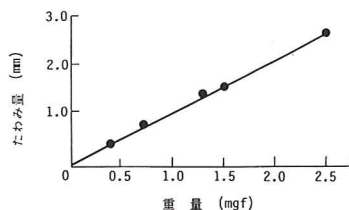


図 2-3 油滴重量とたわみの関係

表 2-3 懸垂棒の熱特性値

熱的性質 懸垂棒材料	熱伝導率 (W/(m・K))	温度伝導率 (m ² /s)
石英棒	1.0	8.0×10^{-7}
白金線	51.6	24.4×10^{-6}
タングステン線	146.3	62.7×10^{-6}
ニッケル線	10.3	24.4×10^{-6}

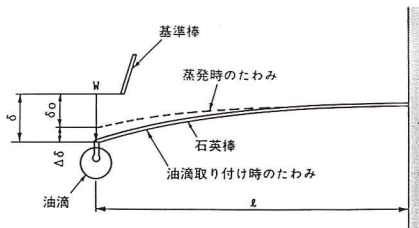


図 2-4 石英棒たわみ量から油滴重量の算出

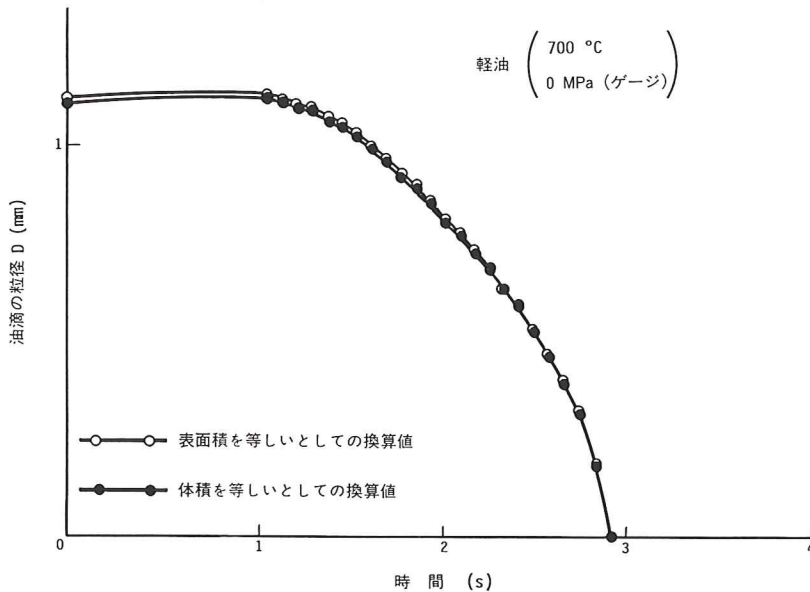


図 2-5 回転だ円体から球へ換算する二方法の比較

た。

$$W = \frac{3E \cdot \Delta\delta \cdot I}{l^3} \dots\dots\dots (2-1)$$

$$\left[I = \frac{\pi}{64} d^4 \right]$$

E : 石英棒の縦弾性係数 (mgf/mm²)

l : 石英棒の長さ (mm)

 $\Delta\delta$: 石英棒のたわみ量 (mm)

W : 油滴の重量 [油滴重量の変化量] (mgf)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

d : 石英棒の直径 (mm)

2. 3. 2 油滴粒径の計測

蒸発時の粒径は、フィルム上に撮影された油滴の外形から次のように求めた。

- (1) 楕円体と球の体積を等しいとして換算を行った場合の換算直径

$$D_1 = \sqrt[3]{l_1 \cdot l_2^2} \dots\dots\dots (2-2)$$

- (2) 楕円体と球の表面積を等しいとした場合の換算値

$$D_2 = l_2 \sqrt{\frac{1}{2} \left[1 + \frac{(l_1/l_2)^2}{\sqrt{(l_1/l_2)^2 - 1}} \cdot \sin^{-1} \frac{\sqrt{(l_1/l_2)^2 - 1}}{(l_1/l_2)} \right]} \dots\dots\dots (2-3)$$

ここで

 D_1, D_2, D : 球の直径 (mm) l_1 : 楕円体の長径 (mm) l_2 : 楕円体の短径 (mm)

測定の結果の一例をとって両者のDを比較してみると図2-5のようになる。また、図2-6に l_1/l_2 と D_1/D_2 の関係を示しているが、その差は最大で2.2%程度の小さいものであり、従って、撮影フィルム上の油滴の読み精度を考慮すると、(2-2)式で油滴の粒径Dを求めても差し支えない。また、油滴の表面積を求めるに当たっては、油滴の形状が回転だ円体に近いので、これを球形と見なした場合の平均直径の2乗で、その表面積を代表する数値とした。

2. 4 蒸発試験

蒸発試験では、ふん囲気ガス N_2 、大気圧力、炉

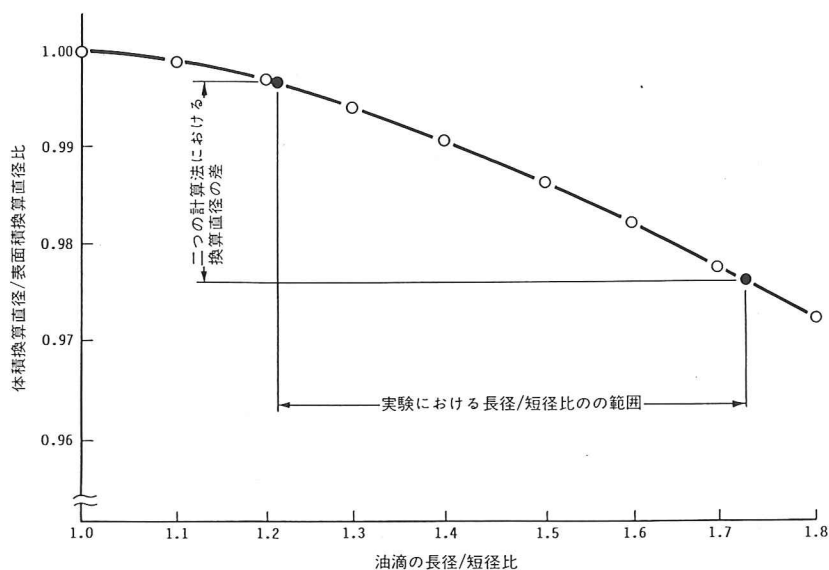


図 2-6 回転円体の直径の換算における二方法の比較

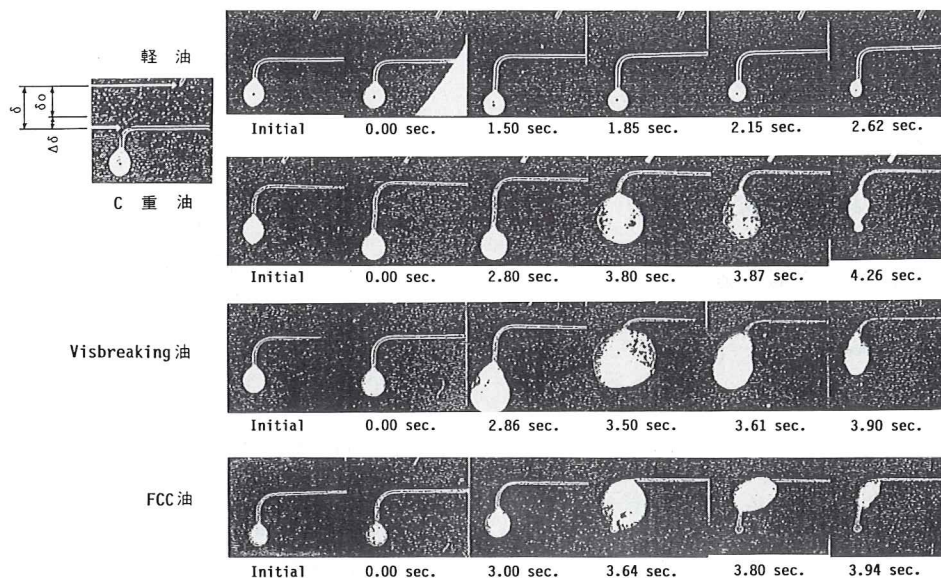


図 2-7 各種燃料油の蒸発状態

内温度700°Cの同一条件で各種の燃料油の蒸発特性を調べた。図2-7は、撮影した各種燃料油の蒸発時の写真である。図2-8は、図2-7から読み取った粒径の2乗値の時間的变化曲線を示している。

図2-7の各種燃料油の蒸発過程の写真に示すように、まず油滴は石英棒の先端につけられ、高温炉が移動し、油滴が炉内に入った瞬間から、周囲の高温空気からの熱伝達および炉壁からの輻射熱により加熱され、油滴内部は表面の高温部から

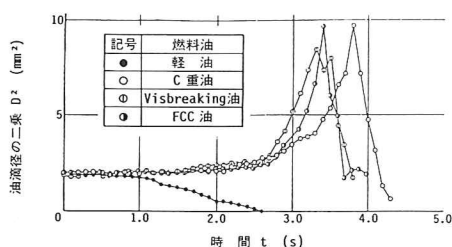


図 2-8 各種燃料油の蒸発特性 (外径変化)

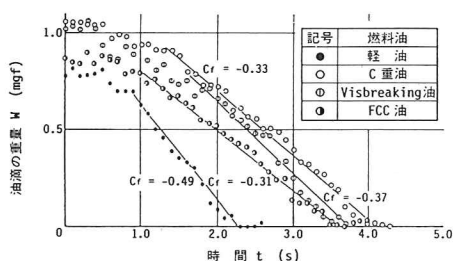


図 2-9 各種燃料油の蒸発特性 (重量変化)

の熱伝導及び油滴内の対流により温度が上昇する。油滴が高温炉の外にある場合 (図 2-7 に示す Initial の状態) と、高温炉に入り、ガラス窓を通してカメラで撮影された瞬間 (図 2-7 で $t=0.00$ 秒の状態) の油滴の外形並びに石英棒のたわみを比較すると、高温炉内の加熱により既にわずかな変化がみられる。軽油の場合は写真でみるように、時間の経過とともに漸次油滴は小さくなり、最後に消滅する。油滴の粒径変化は、図 2-8 に示すように滑らかであり、高温炉に入って、ほぼ 1 秒経過までは粒径変化は少ないが、その後は粒径の 2 乗が時間の経過にしたがって、ほぼ直線的に減少する。初期においては、加熱による油滴内の温度上昇に時間を要し、この間の温度上昇は緩やかであり、その後油滴が高温に維持されると蒸発が盛んになり、油滴の重量軽減が著しくなると考えられる。

一方、低質燃料油である C 重油並びに Visbreaking 油、F. C. C. 油の場合には、蒸発過程の写真 (図 2-7) に示すように、時間経過とともに油

滴の径は次第に大きくなり、表面に凸凹ができて複雑な形状変化をする。これは油滴中の軽質分がさきに蒸発し、これらの軽質分を失った残査は内部から、あわ立ち肥大して多孔性のかかわ状の殻ができるためと思われる。

油滴の直径変化をみると、図 2-8 に示すように油滴の粒径 D^2 は、先ず、時間経過と共に増大していることが分かる。この油滴径の増大時期は、油滴内部に気泡が多くみられ、油滴はある最大径をとると急に収縮する。これらの傾向は、C 重油、Visbreaking 油、F. C. C. 油とも、ほぼ同様の傾向がみられる。

油滴の重量変化を、図 2-7 の写真から (1) 式を用いて求めると、図 2-9 に示すとおりである。図 2-8 と図 2-9 を対比してみると、油滴径 $D=0$ に近づくと共に、重量 $W=0$ に近づくことから、石英棒のたわみの復元性は十分あるとみて差し支えないようである。軽油の場合、初期においては油滴の重量減少割合は少ないが、約 1 秒経過後付近よりの重量減少は大きくなり、その後は時間経過と共に重量が直線的に減少している。この傾向は、図 2-8 に示した油滴径の変化と対応しており、油滴は初期において、加熱により温度上昇し、その間の油滴の外径の変化は少なく、重量の軽減もわずかである。その後の蒸発特性は、時間経過とともに重量が直線的に減少しており、その関係は $dW/dt=C_1=-0.49$ (mgf/s) である。

蒸発開始点の差が見られるのは、比熱等の相違によるものと考えられる。

これに対し、C 重油の場合も、初期においては重量減少は緩やかであるが、蒸発による重量軽減が著しい期間では、時間経過と共に油滴の重量はほぼ直線的に減少しており、同様に $dW/dt=C_1=-0.33$ (mgf/s) である。この傾向は、Visbreaking 油では $C_1=-0.37$ (mgf/s)、F. C. C. 油では $C_1=-0.31$ (mgf/s) となり、軽油に比べて低質油の蒸発性が低いことがわかった。

従来の $d(D^2)/dt$ では粗悪油等の蒸発特性は図 2-8 に示すように評価できなかったが、本方法の、 $dW/dt=C_1$ によれば蒸発特性が適正に評価さ

れ得ることがわかった。

2. 5 燃焼試験

次に油滴の蒸発のみでなく、それを燃焼させて、その状況を観察した。その燃焼試験は周囲圧力および酸素濃度を変化させて実施した。試験に当たっては、前と同じ図2-1の装置において圧力変化試験では高圧空気ボンベから、酸素濃度変化試験では酸素と窒素の混合ガスボンベから、減圧弁を介して圧力容器に所定のガスを送入する。

高温室内部をヒーターで所定の試験温度に設定後、石英棒の先端に付着した油滴の方へ移動させ、油滴は、高温室内に入った後、自然着火し、燃焼する。

図2-10は、各種燃料油の燃焼状態を高速度カメラで撮影した結果であり、各種油滴が蒸発着火、燃焼する様子を各四枚の写真にまとめたものである。いずれも高温室内は加熱装置の許容温度から700°C、大気圧状態に保たれている。1こま目の写真は、油滴が高温室内にはいる直前の初期状態(Initial)を示し、2こま目の写真は、高温室内で油滴が着火している状態を示している。初期状態

における各種油滴径は、いずれも $D \approx 1.4\text{mm}$ 前後の大きさである。

油滴は、高温室内に入り、周囲の高温ガスからの熱伝達により油滴表面から加熱され、油滴の内部は、表面の高温部からの熱伝導および油滴内の対流により加熱され、温度が上昇する。高温となった油滴は、表面から蒸発し、油滴の周囲の燃料蒸気は高温空気と混合してから着火し、油滴は火炎に包まれ、燃焼が進行する。

3こま目の写真は、燃焼が活発に行われている燃焼中期の状態を示すものである。4こま目の写真は、燃焼が終了した後の状態を示すものであり、火炎はみられず、さすが石英棒に付着している。

燃料油の種類による燃焼状況の差を見ると、軽油の場合は油滴表面で着火し、淡い光をもつ火炎が油滴を包み、油滴は漸次小さくなり、黒煙の発生は少ない。しかるに、C重油、Visbreaking油、F. C. C.油などの低質油の場合は、着火と同時に油滴は火炎に包まれる。燃焼初期は、黒煙を伴った穏やかな燃焼をしているが、燃焼中期から油滴内部からの吹き出しによる火炎の飛散が多くみられる。燃焼終了後は、石英棒にさすが付着して残

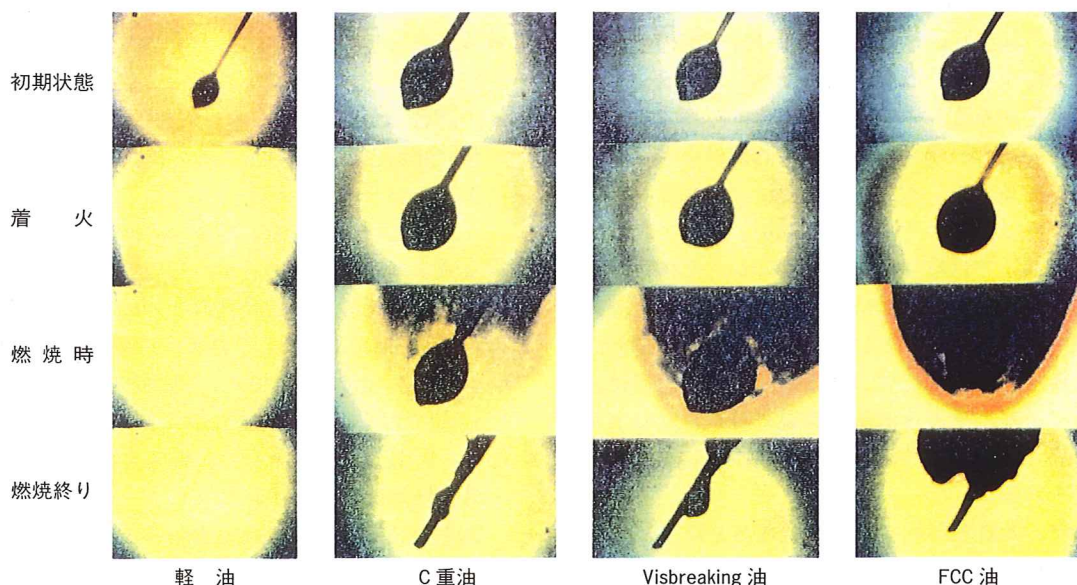


図2-10 各種燃料油の燃焼状態

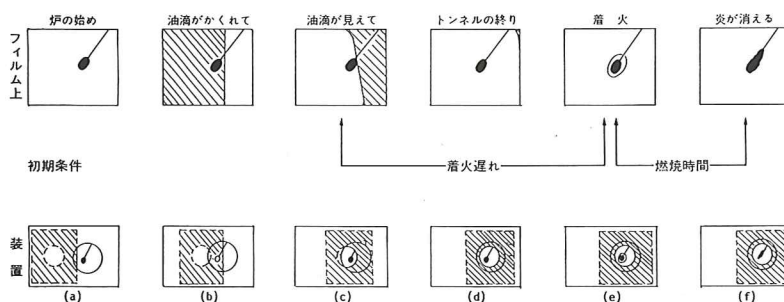


図 2-11 着火遅れと燃焼時間の定義

る。

2. 5. 1 着火遅れ

本試験による着火遅れの定義は、図 2-11 に示す様に高温室に油滴が投入された時から、油滴が着火するまでの時間とした。

図 2-12 は、雰囲気ガスの圧力を変化させたときの着火遅れを示したものである。着火遅れは、圧力の上昇と共に短縮されており、ややばらつきがみられるが、 P^{-n} にほぼ比例している。 n の値は図 2-12 から求めると、軽油が $n=0.9$ に対し、低質油はいずれも $n=0.6$ 前後である。Wolfer ら⁽⁴³⁾ は、着火遅れに関し次の式を示しているが、本試験においても、圧力の影響は同様であるといえる。

$$\tau = \frac{C_1}{P^n} \cdot \exp\left(\frac{C_2}{T}\right) \dots\dots\dots (2-4)$$

τ : 着火遅れ (ms)

T : 絶対温度 (K)

P : 絶対圧力 (MPa)

C_1, C_2, n : 定数

ただし、軽油に比べ低質油の場合、圧力上昇による着火遅れの短縮割合は小さいと見なせる。

2. 5. 2 燃焼時間

燃焼時間としては、図 2-11 に示す様に着火から炎が消える燃焼終わりまでの期間をとった。図 2-13 には各種燃料油の燃焼時間をプロットした。雰囲気が大気圧力の場合、軽油に比べ低質油の燃

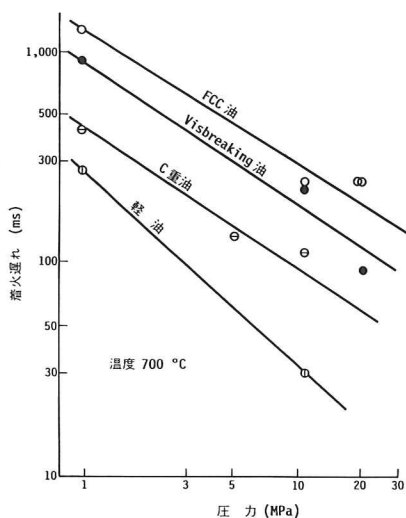


図 2-12 各種燃料油の着火遅れ

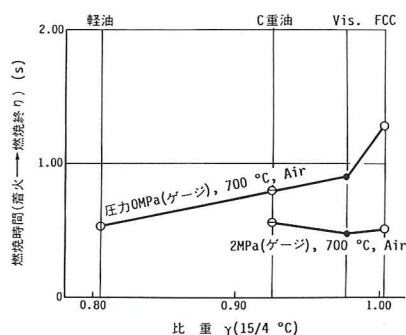


図 2-13 各種燃料油の燃焼時間比較

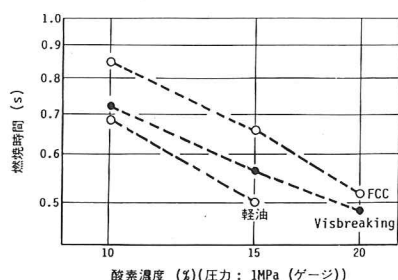


図 2-14 酸素濃度が燃焼時間に及ぼす影響

燃焼時間はかなり伸びている。

雰囲気圧力を高くした場合、燃焼は大気圧の場合に比べて激しくなり、低質油滴内部からの吹き出しによる飛散も激しい。このときの着火から燃焼終了までの時間は、軽油に比べて、低質油のそれはさほど伸びていない。しかし、燃焼終了後に石英棒に付着しているすすの量が多いようである。

これらの実験から、残留炭素あるいは、アスファルテンの多い低質油ほど燃焼残渣が多く、煙またはダストの発生も多いことがわかった。

また、ディーゼル機関の燃焼室内では、局部的にも、時間的にも酸素濃度が異なるので、酸素濃度が変化した場合の各種油滴の燃焼状態を調べてみた。

図 2-14 は、酸素濃度が燃焼時間に及ぼす影響を示す。この結果から、軽油と同じように低質油である Visbreaking 油、F. C. C. 油においても酸素濃度の減少に対する各種燃料油の燃焼時間の増加割合は、ほぼ同じ傾向をもつことがわかった。

2. 6 ま と め

船用ディーゼル機関に、今後、使用されるであろう低質燃料油 (C 重油, Visbreaking 油, F. C. C. 油) に関し燃料分析並びに油滴の蒸発、燃焼試験を実施し、次の事が判明した。

- (1) 油滴の蒸発特性を重量法で求めると、定量的に求められて、しかも従来でできなかった低質燃料油の蒸発特性を把握することができた。
- (2) 軽油の蒸発特性は、油滴粒径の 2 乗が時間の経過にしたがってほぼ直線的に減少し、重量

も直線的に減少する。低質燃料油では油滴粒径は複雑な変化を示すが重量はほぼ直線的に減少し、いずれの場合も $dw/dt = C_r$ で蒸発特性を評価できる。

- (3) Visbreaking 油、F. C. C. 油などの低質燃料油はセタン指数が低く、着火遅れが従来の C 重油に比べて、2～3 倍に伸びている。
- (4) 燃焼時間は、大気圧力下においては、軽油に比べて低質燃料油は燃焼時間が長い。高圧時においては、その差は少なくなる。また、酸素濃度の燃焼時間に対する影響は、いずれの燃料油においても同様の傾向を持っている。
- (5) 燃焼終了後の残渣は、軽油に比べ低質油がきわめて多い。

以上、低質油の基礎試験から、その蒸発特性並びに燃焼特性が把握できた。従来の軽油、低質油に対して、蒸発特性の低さ並びに低セタン価に基づく着火遅れの長さ、燃焼後の残渣の多さが問題である。今後ディーゼル機関でこの種の低質燃料油を燃焼するに当たっては、これらの特性を考慮して燃焼対策を進めて行くことが必要である。

参考文献

- 1) ISME TOKYO'73「燃料の低質化と船用機関の動向」
- 2) B. P., The Motor Ship MAR. 1978. 51頁
- 3) DOXFORD, THE Motor Ship MAY. 1978. 31頁
- 4) SULZER, The Mortor Ship MAY. 1978. 32頁
- 5) 三菱. The Mortor ship JUN. 1978. 64頁
- 6) S. E. M. T., The Mortor Ship JUN. 1978. 61頁
- 7) SWD, The Mortor Ship JUN. 1978. 31～32頁
- 8) M. A. N., The Mortor Ship AUG. 1978. 37～38頁
- 9) B & W, The Mortor Ship SEP. 1978.
- 10) 日本船用機器開発協会; 世界各国の海運造船の新技术とこれから (1978/9) 13～14頁
- 11) 今村; 内燃機関の燃料事情と将来動向, 日本機械学会誌, 83巻744号 (1980/11) 1386～1392頁
- 12) 野崎; 船用機関油低重質化の傾向, 燃料協会誌, 60巻646号 (1980), 76～94頁

- 13) 泉；ディーゼル機関における低質油燃焼，日本船用機関学会，Vol. 17, No. 7(1982/9)31～37頁
- 14) 田中，松田；自動車用燃料の将来，自動車技術，Vol. No. 1 (1982)，15～18頁
- 15) M. Ogawa. et. al; Investigation On Degraded Fuels in A Medium-Speed Diesel engine, Proceeding of 14 CIMAC. D43 (1981-6)
- 16) G. Fiskaa et. al; The Effect of A Changing Heavy Fuel Quality On Diesel Engine Operation, Proceeding of 14th CIMAC D62 (1981-6)
- 17) 塩出，辻；小型ディーゼル機関による低質油の燃焼実験について，日本船用機関学会 Vol. 17, No. 8 (昭和57-8) 579～586頁
- 18) 針谷他2名；予燃室式ディーゼル機関における低質油の燃焼，自動車技術会論文集 No. 27 (1983) 10～17頁
- 19) Zeelenberg A. P. et al; The Ignition performance of Fuel Oils in Marine Diesel Engines, Proceeding of 15th CIMAC, D13-2 (1983-6) 1455～1469頁
- 20) 田中；Sulzer 大型機関，日本船用機関学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 116～120頁
- 21) 高須，大窪；Sulzer ZA40中速機関，日本船用機関学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 120～122頁
- 22) Ole Groene 他2名；B & W，日本船用機関学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 122～126頁
- 23) 清水；M. A. N.，日本船用機械学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 126～130頁
- 24) 轟；S. E. M. T. Pielstick，日本船用機械学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 130～133頁
- 25) 加納，渡辺；Mak，日本船用機械学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 133～137頁
- 26) 孝橋；S. W. D.，日本船用機械学会，Vol. 17, No.9 (昭和57-9) 138～142頁
- 27) 高橋他2名；UE，日本船用機械学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 142～147頁
- 28) 市川，緒方；(株)赤阪鉄工所，日本船用機械学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 148～149頁
- 29) 川上；(株)新潟鉄工所，日本船用機械学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 150～151頁
- 30) 氏家，増井；ヤンマーディーゼル(株)，日本船用機械学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 152～154頁
- 31) 鍵山；ダイハツディーゼル(株)，日本船用機械学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 154～157頁
- 32) 正橋；阪神内燃機工業(株)，日本船用機械学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 157～161頁
- 33) 羽山；(株)松井鉄工所，日本船用機械学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 161～163頁
- 34) 槇田；(株)槇田鉄工所，日本船用機械学会，Vol. 17, No. 9 (昭和57-9) 163～165頁
- 35) 橋本高明；船用燃料油の変遷，日本船用機関学会，Vol. 24, No. 2 (1989-2) 87～92頁
- 36) 田中；中速ディーゼル機関における低質油燃焼，日本船用機関学会，Vol. 20, No. 8 (1985-8) 493～495頁
- 37) B. Isdal et. al; The Development of A New Medium Speed Engine for Marine Propulsion and Power Generation, Proceeding of 16th CIMAC. D3 (1985-6)
- 38) 伊藤恭裕他3名；中速ディーゼル機関の高粘度油燃焼試験，日本船用機関学会，Vol. 21, No. 12 (1986-12) 26～33頁
- 39) 中野英明他3名；中速ディーゼル機関の低質油燃焼試験，日本船用機関学会，Vol. 17, No. 11 (1982-11) 914～917頁
- 40) 塩出 他1名；中速ディーゼル機関の低質油燃焼，日本船用機関学会，Vol. 20, No. 11 (1985-6) 370～373頁
- 41) 張 瓏他4名；高速ディーゼル機関におけるA/Cブレンド油燃焼，日本船用機関学会，Vol. 21, No. 12 (1986-12) 16～25頁
- 42) 末次他2名；粗悪燃料油滴の蒸発特性（第一報 計測方法），日本船用機関学会第28回学術講演前刷集（1980/10）
- 43) Wolfer, H; Der Zundverzug im Dieselmotor. VDI-Forsch-Heft 392 (1938)
- 44) 末次他2名；粗悪燃料油滴の燃焼に関する研究，第2回内燃機関合同シンポジウム講演前刷集（1981/1）
- 45) 末次他2名；粗悪燃料油滴の蒸発特性（第二報 試験結果），日本船用機関学会第29回学術講演前刷集（1981/5）